

基于快速成型技术生成等高线的方法

万程辉^{1,2},程效军¹,程小龙¹

(1. 同济大学 测绘与地理信息学院, 上海 200092; 2. 南昌工程学院 水利与环境工程学院, 江西 南昌 330099)

摘要: 提出利用快速成型技术构建等高线的算法. 首先利用快速成型技术对点云进行分层, 通过对等高线上下两层点云加权计算等高线特征点; 然后将特征点转化为格网图像, 并利用行列格网直线段对格网图像进行快速轮廓提取及边界跟踪; 最后采用 B 样条曲线拟合生成等高线. 试验表明, 该方法生成的等高线, 不仅具有良好的质量, 而且减少了构建三角网的中间过程, 提高了计算效率.

关键词: 等高线; 快速成型技术; 分层厚度; 特征点; 行列格网直线段

中图分类号: P237.3

文献标志码: A

Contours Generated by Rapid Prototyping Technology

WAN Chenghui^{1,2}, CHENG Xiaojun¹, CHENG Xiaolong¹

(1. College of Surveying and Geo-Informatics, Tongji University, Shanghai, 200092, China; 2. School of Water Resources and Ecological Engineering, Institute of Technology, Nanchang 330099, China)

Abstract: This paper presents a new contour generation method based on rapid prototyping technology. It stratifies point clouds by adopting rapid prototyping technology. The feature points are derived by calculating the weighted coordinates of points of the upper and lower layers. The feature points are projected onto a plane and converted to a grid image. The image outline is extracted and the edge tracking is performed by the line segment of the grid. Finally, B-spline fitting is used to generate the contours. The experiment shows that the proposed method not only generates contour lines with good quality but also improve the efficiency of operations by reducing the process of building a triangular network.

Key words: contour; rapid prototyping technology; stratification thickness; characteristic points; row and column

line segment

随着数字高程模型(DEM)在各个领域中的广泛应用,迫切需要根据应用要求对 DEM 表达进行相互转换^[1]. DEM 从传统单点数据采集方式发展到大范围、非接触的快速获取,如 LiDAR(light detection and ranging)、VBLS(vehicle-borne laser scanning)和 TLS(terrestrial laser scanner)等,采集的地表数据以海量形势发展,因此 DEM 建立首先需要考虑计算的效率问题.传统离散点建立三角网模型插值生成等高线的算法已经相对成熟^[2-4],但由于海量点云构建三角网耗时长、Delauney 三维算法不完善等原因,所生成的等高线存在断线多、不够光滑甚至相交等缺点,无法满足当前应用的需求,需要后期处理完善^[5].

快速成型技术(rapid prototyping, RP)与逆向工程技术(reverse engineering, RE)集成为等高线的生成提出一种新的研究思想,它是利用分层叠加原理构建实体三维模型的一种新方法^[6].目前,利用 RP 技术生成等高线算法主要有截交法和投影法^[7],前者主要通过点云之间最小空间距离与平面截交的方法生成等高线,后者将点云分层与平面投影而提取等高线.孙玉文等^[8]提出建立最小距离关联点标记,计算这些点的连接与等高线平面的交点,将这些交点有序化生成等高线.Liu 等^[9]将投影在平面上点云先拟合成曲线,将曲线上非特征点删除,保留特征点连接成中间曲线模型(IPCM).吴杭彬等^[10]对分层投影平面上点云采用凸包算法,提取对象等值线的多细节表达.这些对于海量点云计算最小距离的算法,同样比较耗时,可依据空间比例的属性特点,加以数据分块,以提高计算效率.Kumbhar 等^[11]采

收稿日期: 2012-04-22

基金项目: 国家自然科学基金(40971241);现代城市测绘国家测绘地理信息局重点实验室(20111205W)

第一作者: 万程辉(1975—),男,副教授,博士生,主要研究方向为三维激光扫描数据处理与建模. E-mail: 252203824@qq.com

通讯作者: 程效军(1964—),男,教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为数字近景摄影测量与三维激光扫描建模.

E-mail: cxj@tongji.edu.cn

用网格八邻域排序算法提取图像轮廓。杨必胜等^[12]对车载 LiDAR 点云数据提取特征值,将地物进行分类。投影法中采用了数字图像处理的方法,将点云网格划分转化为栅格图像,格网内的点云提取为格网一个特征值,提高了特征提取效率,本文算法也是基于这种思想的一种改进方法。

本文采用 RP 技术减少中间构建三角网的过程,同时减少了点云的计算数量,从而提高了计算效率。该方法需要解决以下三个方面的问题:①点云数据组织,计算最佳的分层厚度与网格边长;②分层后点云轮廓的提取,快速准确提取轮廓位置;③精确获取等高线特征点,将提取的特征点拟合生成光滑的等高线。

1 基于 RP 技术点云分层

首先对点云数据计算平面格网边长,根据 Piegl 等^[13]对 K 最近邻域的研究,计算点云投影在平面上的格网边长

$$L = \alpha \sqrt{(X_{\max} - X_{\min})(Y_{\max} - Y_{\min})/N} \quad (1)$$

式中: α 为格网边长比例缩放因子; N 为点云总数量。格网边长影响格网特征点的计算效率,根据 Piegl 等的试验表明, α 取值范围在 1.0~1.5 之间为最佳计算效率的格网边长。

点云格网边长确定后,根据 RP 技术对点云提取分层数据,RP 技术分层方式有等厚度与自适应厚度两种^[7]。根据等高线的等高距性质选择等厚度分层。沿高程方向设置一个分层厚度 d ,为了减少分层投影误差,提取等高线上下层的点云数据。

分层厚度 d 直接影响投影在上下层格网内的点云数量,因而采用格网内点云的高差平均值为依据。由于点云间距不同,计算高差平均值也不一致,因而采用比例因子调节高差平均值,使格网内的点云分布更为均匀。

$$d = \beta \frac{1}{k} \sum_i^k d_i, i = 1, 2, \dots, k \quad (2)$$

式中: β 为分层厚度比例缩放因子, k 为格网内点云数量, d_i 为点云之间高差值。根据格网内的高差平均值大小比较,选取最高的高差平均值为分层厚度参考值,考虑扫描点云分布不均匀与地表坡度等影响, β 范围选取在 1.0~1.5 之间,将分层厚度适当放大,确保上下层格网内点的分布均匀,同时使提取的点云数量不太冗余。

如图 1 所示,将分层厚度设为 d ,等高线高程设

为 H_0 ,在等高线上下两层提取 $[H_0 - d, H_0 + d]$ 范围内的点云,其余的点云数据不参与计算,以提高计算效率。

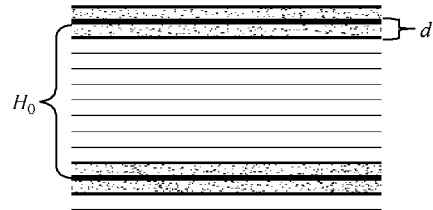


图 1 上下分层提取点云

Fig.1 Extracting point clouds of the upper and lower layers

2 点云特征轮廓提取算法

特征轮廓提取主要包括分层提取数据,构造格网单元内特征点的计算,图像轮廓提取及跟踪,以及拟合成光滑曲线。主要流程如图 2 所示。

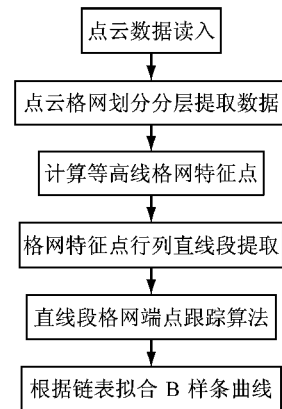


图 2 直接生成等高线流程图

Fig.2 The flow chart of the contours generated directly

2.1 轮廓特征点计算

点云提取格网特征值有两种不同的解释^[14]。第一种是格网栅格观点,认为格网单元的值是格网内所有点的平均高程值;第二种是点源栅格观点,认为格网单元数值是格网中心点的高程,采用距离加权平均方法进行计算。本文的等高线特征点采用点源栅格,而提取的格网特征点通过高差加权平均的方法计算。如图 3 所示,根据等高线上下层点云分别计算出网格特征点 f_U 与 f_L ,再通过这两个点插值生成等高线特征点 f_{ij} , U 表示上层格网点云, L 表示下层格网内点云, ij 表示格网的行列号。

首先计算出格网内的点云与等高线之间的高差

$$h_m = H_m - H_0, m = 1, 2, \dots, k \quad (3)$$

式中: H_m 为点云的高程。当 $H_m = H_0$ 时,直接为格

网特征点.

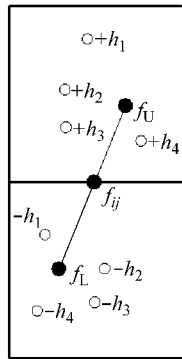


图 3 特征点计算

Fig.3 The feature point calculation

权 p_m 的定义为:点云与等高线的高差越小权值越大. 因而定权

$$p_m = \frac{1}{h_m}, \quad h_m \neq 0 \quad (4)$$

等高线上下层对应格网内分别提取出一个特征点 f_U 与 f_L , 分别计算其重心加权坐标为

$$\begin{cases} X_U = \frac{\sum p_m x_{Um}}{\sum p_m} \\ Y_U = \frac{\sum p_m y_{Um}}{\sum p_m} \\ H_U = \frac{\sum p_m H_{Um}}{\sum p_m} \end{cases}, \begin{cases} X_L = \frac{\sum p_m x_{Lm}}{\sum p_m} \\ Y_L = \frac{\sum p_m y_{Lm}}{\sum p_m} \\ H_L = \frac{\sum p_m H_{Lm}}{\sum p_m} \end{cases} \quad (5)$$

最后对等高线上下两层的特征点进行插值计算等高线特征点 f_{ij} 为

$$\begin{cases} X_{ij} = X_U + \frac{(H_U - H_0)}{(H_U - H_L)}(X_L - X_U) \\ Y_{ij} = Y_U + \frac{(H_U - H_0)}{(H_U - H_L)}(Y_L - Y_U) \end{cases} \quad (6)$$

2.2 行列格网直线段结构

为了提高图像处理效率,采用一种行列格网直线段的方式对格网进行快速轮廓提取及边界跟踪.

首先对具有特征点的格网进行图像二值化,对具有特征点的格网取值为 1,其余格网取值为 0. 采用行与列直线段的方式记录图像轮廓,先逐行扫描图像格网,对连续数值为 1 的格网建立直线段数据,称为行格网直线,记录格式为 $[X_i, (Y_a, Y_b)]$ ($Y_a < Y_b$),表示第 X_i 行上,从第 Y_a 列到第 Y_b 列的格网直线段. 而在列方向也逐列扫描连续数值为 1 的格网,记录为列格网直线段,格式为 $[Y_i, (X_a, X_b)]$ ($X_a < X_b$). 扫描完直线段后,剩下不具有直线段性质数值为 1 的单元格网进行单独记录其行列位置.

通过行与列双向扫描格网直线段后,只需保留格网直线段的首尾端点位置,如图 4 中在第一行记录的直线段为 $[X_1, (Y_3, Y_8)]$,第一列直线段为 $[Y_1, (X_3, X_6)]$,图中黑点为格网直线段端点位置,白圈为直线段中间格网特征点位置.

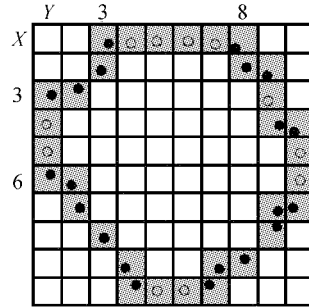


图 4 格网直线段端点

Fig.4 The grid line segment endpoints

2.3 格网直线段端点跟踪算法

根据生成等高线的点云为带状分布,以及曲率夹角主要为钝角等特征,对格网直线段相邻端点进行边界跟踪,主要有以下四个方面:

(1)搜索具有相同端点直线段. 根据行直线段端点搜索具有相同端点的列直线段,进行链表记录;同样根据列直线段端点搜索具有相同端点的行直线段,进行链表记录.

(2)不具有相同端点的直线段,通过搜索四个对角格网位置,如图 5 所示,每个格网端点搜索左右或上下对角位置,从而提高跟踪效率.

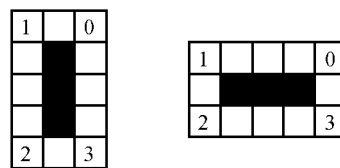


图 5 直线段端点跟踪

Fig.5 The line segment endpoint tracking

(3)没有搜索到的直线段端点,一种情况为非封闭等高线首尾端点,另一种情况为端点缺失,可通过在一定范围内判断距离最近的两个端点连接.

(4)单元格网作为一个独立特征点,通过四个对角格网位置与最近距离进行跟踪判断,而超过一定范围时将其删除.

2.4 特征点拟合成光滑曲线

将格网直线段端点行列位置映射到特征点坐标,所对应特征点根据轮廓跟踪顺序对特征点进行排序.

由于 B 样条曲线具有凸包性、局部性等优点,因

此采用 B 样条曲线拟合特征点 f_{ij} 生成光滑等高线. 如图 6 所示,图中点为特征点,经 B 样条曲线拟合形成光滑曲线,折线为控制线.

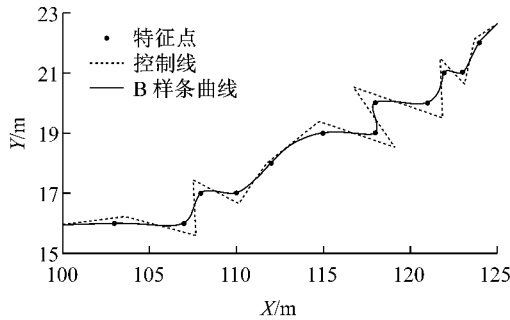


图 6 特征点拟合 B 样条曲线
Fig.6 Feature points fitting B-spline

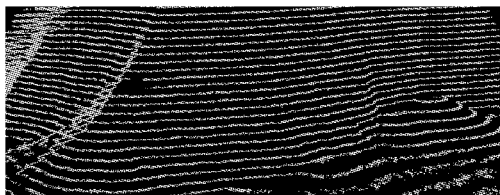
3 试验结果与分析

本文选取范围约为 $2\text{ km} \times 1\text{ km}$,高差为 286.6 m 的山体作为试验对象,以 Leica ScanStation C10 三维激光扫描仪通过八个地面测站扫描,获取山体点云数据,经去噪、压缩等处理后,获取点云数量为 629.4 万个的试验样本,如图 7a 所示.在电脑配置为 CPU2.53 GHz、内存 4 G、WIN7 系统上,基于 Visual C++6.0 与 Coin3D 平台进行算法测试.

算法通过分层投影的格网特征点而构建等高线,设置等高距为 $H_0=2.5\text{ m}$,根据式(2),计算出格网内点云平均高差值在 $0.05\sim 0.16\text{ m}$ 之间,选取最大平均高差值 $0.16\text{ m}(\beta=1.5)$ 计算的分层厚度为 $d=0.25\text{ m}$,如图 7b 所示分层后提取的点云,数量为 128.9 万个.



a 山体点云



b 分层后提取点云

图 7 山体点云数据

Fig.7 Point clouds of the mountain

为了比较等高线的生成效果,试验测试了在格

网边长 $L=0.5\text{ m}$ 与 $L=1.0\text{ m}$ 两种情况,根据式(1)最佳格网比例因子范围,选取 $\alpha=1.49$ 计算的格网边长 $L=1.0\text{ m}$ 与缩小 1 倍的格网边长 $L=0.5\text{ m}$ 进行对比,其格网比例因子 $\alpha=0.75$. 本文算法同时与三角网插值法生成等高线效果进行了比较,三角网插值法先建立三角网然后插值生成等高线,其中,为了减少建立三角网耗时,将点云压缩至 42.9 万个作为构网数据.

图 8a 为三角网插值等高线,b 为格网边长 $L=0.5\text{ m}$ 的等高线,c 为格网边长 $L=1.0\text{ m}$ 的等高线. d~f 分别为 a~c 图中矩形框内局部放大效果.从显示效果对比可以看出,三角网生成等高线算法所生成等高线断线较多,构建等高线质量较差,需要进一步优化处理才能应用.本文算法通过直接提取特征点而拟合生成的等高线,具有光滑、连续等优点,克服了传统的基于三角网构建等高线所存在的断裂、交叉等缺陷.

试验对比两种不同的格网边长对等高线的显示效果,从图 8e,f 中看出, $L=0.5\text{ m}$ 所生成的等高线细节详细,但不够光滑;而 $L=1.0\text{ m}$ 格网边长所生成等高线,表现光滑连续,符合等高线的显示.对两组等高线特征点精度评价采用 DEM 格网插值中误差指标^[15]

$$E_i = \sqrt{\sum_{i=1}^n (z_i - z'_i)^2 / n} \quad (7)$$

式中: E_i 为 DEM 的插值中误差; n 为格网特征点数量; z_i 为格网特征点高程真值,由于格网特征点高程真值不能直接获取,这里以网格内所有点的平均高程值近似作为真值; z'_i 为格网特征点的高程值,为每条等高线高程值.如表 1 中所示,格网边长 $L=0.5\text{ m}$ 与 $L=1.0\text{ m}$ 的格网特征点高程中误差相差不大,说明上下分层方式减少了格网内特征点的高程影响,减少了投影误差对等高线高程的影响.因此格网边长在等高线满足精度一定范围内,比较等高线的光滑效果,格网边长 $L=1.0\text{ m}$ 所生成等高线更佳.

表 1 两种等高线质量评价

Tab.1 Two kinds of contours' quality evaluation			
L/m	特征点数/个	提取点云数/个	高程中误差/m
0.5	99 965	233 213	0.028 9
1.0	45 551	300 028	0.029 5

同时,为了分析本文算法生成等高线的计算效率,分别对上述三种等高线计算耗时进行了统计,其结果如表 2 所示.从表 2 的耗时对比可以看出,基于三角网插值生成等高线在构建三角网时需要消耗大量时间,等高线生成效率低且质量不高;而本文算法

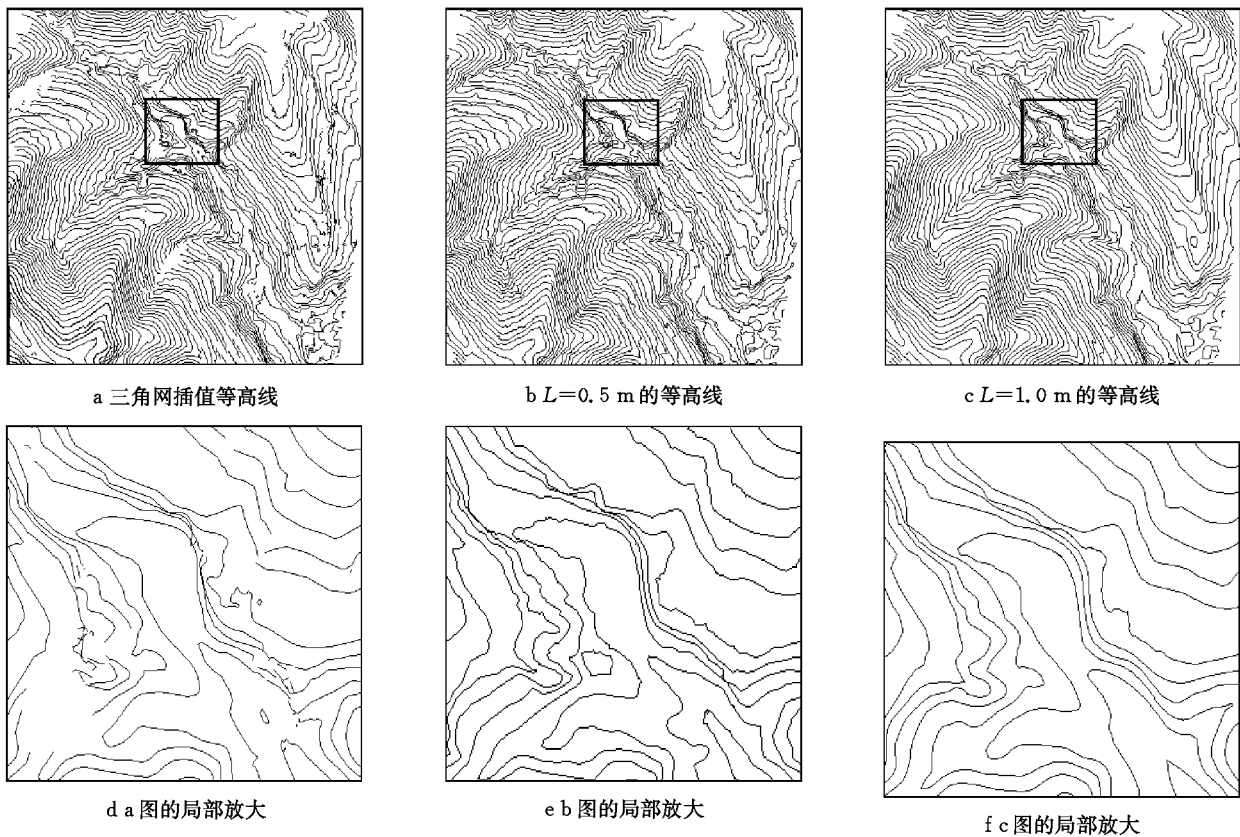


图 8 等高线效果比较

Fig. 8 Comparison of the contours' effectiveness

充分利用 RP 技术与格网图像算法优点,基于海量点云分层直接生成等高线,减少了三角网构网过程,缩短了算法执行时间,大大提高了等高线的生成效率.

段记录特征点位置,能减少循环搜索时间,删除部分格网直线段中间特征点,提高计算效率,并使等高线更光滑.采用 RP 技术快速生成等高线,具有计算耗时少,等高线质量高等优点,因而有重要应用价值.

表 2 生成等高线所耗时间

Tab.2 The time spent to generate contour lines

方法	点云数量/万个	处理过程及耗时	生成等高线耗时/s
三角网法	42.9	生成三角网,31.4 s	3.1
本文方法	L=0.5 m	分层处理,4.3 s	6.5
	L=1.0 m	分层处理,3.5 s	5.1

4 结语

本文针对地面三维激光仪获取的海量地表散乱点云,提出基于 RP 与 RE 技术集成生成等高线的方法,解决的主要问题有:①对山体点云沿高程方向进行分层,确定点云的分层厚度,减少了格网内的点云分布不均匀;②提出了格网内等高线特征点位置的计算方法,计算出等高线上下层方格内的点云高差加权重心坐标,通过上下层两个特征高程点插值,精确求出格网内等高线特征点;③采用行列格网直线

参考文献:

- [1] 费立凡,何津,马晨燕,等. 3 维 Douglas-Peucker 算法及其在 DEM 自动综合中的应用研究[J]. 测绘学报, 2006, 35(3): 278.
FEI Lifan, HE Jin, MA Chenyan, et al. Three dimensional Douglas-Peucker algorithm and the study of its application to automated generalization of DEM [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2006, 35(3): 278.
- [2] Axelsson P. DEM generation from Laser scanner data using adaptive TIN models [J]. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 2000, 33(B4/1): 110.
- [3] Mar J. DEM generation and building detection from LiDAR data [J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2005, 71(7): 847.
- [4] Meyers D, Skinner S. Surfaces from contours [J]. ACM Transactions on Graphics, 1992, 11(3): 228.
- [5] 王宗跃,马洪超,彭检贵,等. 基于 LiDAR 数据生成光滑等高线[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2010, 35(11): 1318.
WANG Zongyue, MA Hongchao, PENG Jianguai, et al. A smooth contour generation method based on LiDAR data [J].

- Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2010, 35(11): 1318.
- [6] Lee K H, Woo H. Direct integration of reverse engineering and rapid prototyping[J]. Computers & Industrial Engineering, 2000, 38(1): 21.
- [7] 赵吉宾, 刘伟军. 快速成型技术中分层算法的研究与进展[J]. 计算机集成制造系统, 2009, 15(2): 209.
ZHAO Jibin, LIU Weijun. Recent progress in slicing algorithm of Rapid Prototyping technology [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2009, 15(2): 209.
- [8] 孙玉文, 贾振元, 王越超, 等. 基于自由曲面点云的快速原型制作技术研究[J]. 机械工程学报, 2003, 39(1): 56.
SUN Yuwen, JIA Zhenyuan, WANG Yuechao, et al. Rapid prototyping manufacturing based on point cloud data from free-form surface[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(1): 56.
- [9] Liu G H, Wong Y S, Zhang Y F, et al. Adaptive fairing of digitized data points with discrete curvature [J]. Computer-Aided Design, 2002, 34(4): 309.
- [10] 吴杭彬, 刘春. 激光扫描数据的等值线分层提取和多细节表达[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2009, 37(2): 267.
WU Hangbin, LIU Chun. Point cloud based stratified contour extraction and its multi-LOD expression with ground laser range scanning [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2009, 37(2): 267.
- [11] Kumbhar V K, Pandey P M, Rao P V M. Improved intermediate point curve model for integrating reverse engineering and rapid prototyping [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008, 37(5/6): 553.
- [12] 杨必胜, 魏征, 李清泉, 等. 面向车载激光扫描点云快速分类的点云特征图像生成方法[J]. 测绘学报, 2010, 39(5): 540.
YANG Bisheng, WEI Zheng, LI Qingquan, et al. A classification oriented method of feature image generation for vehicle borne Laser scanning point clouds[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2010, 39(5): 540.
- [13] Piegl L A, Tiller W. Algorithm for finding all k nearest neighbors [J]. Computer-Aided Design, 2002, 34(2): 167.
- [14] 王涛. 地貌信息提取中的结构化问题研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2005.
WANG Tao. Extraction of structural geomorphometrical information from digital elevation models[D]. Wuhan: Wuhan University, 2005.
- [15] 王光霞. DEM精度模型建立与应用研究[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2005.
WANG Guangxia. Researches on establishment and application of DEM precision models[D]. Zhengzhou: The PLA University of Information Engineering, 2005.

~~~~~

(上接第 874 页)

价的时候,应当考虑诸多因素的制约和限制,如经济、政治、社会、技术、生态环境、市场需求、原材料供应、劳力资源、交通运输、公共设施、能源条件、信息系统等。这里,任何一个因素任何一个环节失调,都将影响其他因素其他环节以至影响全局。因此,对各种水处理工艺技术方案进行评价时,必须全面考虑,综合分析,以保证生态综合分析的客观性与准确性,应该实事求是,运用科学、有效的方法分析评价,得出正确的结论。

参考文献:

- [1] Xu P, Valette F, Brissaud F, et al. Technical-economic modelling of integrated water management; wastewater reuse in a French island[J]. Water Science and Technology, 2001, 43(10): 67.
- [2] Chowdhury S, Husain T. Evaluation of drinking water treatment technology: an entropy-based fuzzy application[J]. Journal of Environmental Engineering, 2006, 132(10): 1264.
- [3] Thawale P, Ghosh T, Singh S, et al. Agro-economic evaluation of water resource project—a modeling approach [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2012, 184(4): 2575.
- [4] Li X Y, Dai D S, Zhang K. Analysis on fuzzy integrated method of engineering project risk evaluation [C]// International Conference on Construction and Real Estate Management. Hong Kong: [s. n.], 2003: 52-55.
- [5] Zhang TF, Yan J, Zhang X, et al. Research on the risk assessment of engineering project based on grey theory and fuzzy mathematics [C]// 4th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing. Dalian: [s. n.], 2008: 10724-10728.
- [6] 刘涛. 2010中国污水处理厂名录[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.  
LIU Tao. 2010 Chinese sewage treatment plant directory[M]. Beijing: China Machine Press, 2010.
- [7] Rahman S, Zayed T. Condition assessment of water treatment plant components[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2009, 23(4): 276.
- [8] Aragones-Beltran P, Pastor-Ferrando J P, Garcia-Garcia F. An analytic network process approach for siting a municipal solid waste plant in the metropolitan area of Valencia (Spain) [J]. Journal of Environmental Management, 2010, 91(5): 1071.